

О моделировании лазера на парах меди с добавками водорода

Г.Г.Петраш

Рассмотрены результаты компьютерного моделирования импульсного лазера на парах меди с добавками водорода, приведенные в [1–4]. Отмечено, что принятый в этих работах метод моделирования имеет ряд существенных недостатков. В частности показано, что полученная с его использованием предимпульсная температура электронов существенно ниже температуры стенки газоразрядной трубки, что явно противоречит термодинамике. Обсуждаются возможные причины получения ошибочных результатов.

Ключевые слова: импульсный лазер на парах меди, влияние добавок водорода, компьютерное моделирование.

В журнале «Квантовая электроника» опубликована обширная статья А.М.Бойченко и др. [1], в которой описана теоретическая модель лазера на парах меди (ЛПМ) с добавками водорода и приведены результаты расчетов характеристик генерации и плазмы импульсного разряда. Тот же вопрос обсуждается и в других статьях этих же авторов [2–4]. Во всех работах используется одна и та же модель, имеющая следующие основные особенности.

1. Процессы в системе импульсного питания в большинстве случаев не моделируются, а берется импульс тока $J(t)$ через газоразрядную трубку (ГРТ), измеренный в режиме регулярных импульсов. Используя $J(t)$, авторы рассчитывают средние по объему характеристики плазмы и генерации. Для этого задаются какие-то начальные условия и с тем же импульсом $J(t)$ проводятся итерации, т.е. процессы в импульсах возбуждения и в межимпульсных интервалах последовательно просчитываются до тех пор, пока результаты не перестанут меняться от импульса к импульсу. Полученные результаты рассматриваются как *самосогласованные*.

2. Уравнения для температуры газа T_g не решаются и T_g в статьях не указывается.

Результаты моделирования в [1, 2] сравниваются с результатами моделирования таких же лазеров в [5, 6]. Утверждение авторов [1, 2] о хорошем согласии с [5, 6], на наш взгляд, не обосновано. Ограниченный объем письма не позволяет подробно проанализировать здесь результаты работ [1–4], более подробный их анализ дан в [7]. Здесь мы рассмотрим только результаты расчетов предимпульсной температуры электронов T_e и населенностей нижних лазерных уровней $N(^2D)$, вызывающие наибольшие возражения.

В большинстве случаев рассчитанные в [1–4] температуры электронов T_e намного ниже разумных оценок T_g , а часто даже ниже температуры стенки ГРТ T_w . В качестве примера в табл.1 приведены результаты расчетов

из работ [3, 4], относящиеся к лазеру «Кристалл-ЛТ-40». Видно, что с ростом концентрации водорода и соответственно T_w температура T_e непрерывно падает, оставаясь все время ниже и T_w и T_g . Низкие значения T_e приводятся, как видно из табл.1, к низким предимпульсным значениям $N_{D_{5/2}}$, которые все время меньше равновесных значений, соответствующих T_w . Таким образом, рассчитанные в [3, 4] значения T_e и $N_{D_{5/2}}$ явно ошибочны и просто противоречат законам термодинамики. Результаты моделирования в [1, 2] также содержат аналогичные ошибки, хотя там они менее заметны.

Вызывает удивление то, что авторы не замечают и никак не обсуждают эти особенности результатов своего моделирования. Как минимум, следовало бы объяснить, вследствие какого процесса населенность метастабильных уровней становится ниже равновесной населенности с T_w и T_g . Можно предположить, что авторы принимали T_g равной T_w (а это само по себе должно приводить к серьезным ошибкам), что и способствовало получению низких значений предимпульсной T_e . Однако это не объясняет, почему рассчитанные значения $T_e < T_w$.

Прежде всего возникает вопрос, каким образом моделирование приводит к значениям $T_e(0)$, намного меньшим не только T_g , но и T_w . Такая ситуация возможна по двум причинам: если в уравнении учитывается какой-то существенный процесс охлаждения электронов, но не учитывается обратный ему процесс нагрева, или если

Табл.1. Предимпульсные значения T_e и населенности метастабильных уровней меди при разных добавках водорода для лазера «Кристалл ЛТ-40».

Параметры	N_{H_2} (10^{16} см $^{-3}$)					
	0	0.0827	0.32	1.6	2.0	3.2
N_{Cu} (10^{15} см $^{-3}$)	1	1.277	1.424	1.587	1.765	2
T_e (эВ)	0.145	0.147	0.13	0.121	0.116	0.103
T_e (К)	1683	1590	1509	1404	1346	1195
T_w (К)	1773				1825	
$N_{D_{5/2}}$ (10^{11} см $^{-3}$)	2.5	1.85	1.42	0.958	0.791	0.543
$N_{D_{5/2}}$ (10^{11} см $^{-3}$)*	3.36				7.608	
T_g (К) (оценка [7])						≥ 4300

* Равновесные значения, соответствующие T_w .

Г.Г.Петраш. Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН, Россия, 119991 Москва, Ленинский просп., 53; e-mail: gpetrash@sci.lebedev.ru

Поступила в редакцию 17 декабря 2004 г., после доработки – 23 марта 2005 г.

сам метод моделирования имеет серьезные пороки. Выявить в рассматриваемых статьях первую причину не удалось. Рассмотрим возможные дефекты метода моделирования.

Сразу следует отметить, что модель, принятая в [1–4], не может считаться *самосогласованной*. В мировой литературе установилось определенное понятие самосогласованной модели. В работах [5, 6, 8–12], в которых эти модели описываются, задаются начальные значения основных параметров задачи (T_w , N_{Ne} , характеристики ГРТ, характеристики системы импульсного питания и др.). Далее путем итераций просчитываются в ряду импульсов характеристики импульсов возбуждения и на этой основе моделируется кинетика, т. е. рассчитываются $T_e(t)$, $n_e(t)$, T_g , населенности уровней, импульс генерации и другие параметры. Эти расчеты проводятся как в течение импульсов возбуждения, так и в межимпульсные интервалы до тех пор, пока рассматриваемые параметры не перестанут меняться от импульса к импульсу, т. е. пока не установится режим регулярных импульсов.

По мере увеличения числа импульсов газ нагревается, в связи с чем меняется плотность буферного газа и меди, возникает градиент T_g , T_e и n_e , растут значения $n_e(0)$, $T_e(0)$ и их градиенты и происходит соответствующее изменение кинетики. При этом заметно изменяются характеристики импульса возбуждения $J(t)$ и $U(t)$ (см. [13–15]), согласование системы питания с ГРТ и т. д. Все эти процессы в большой степени взаимосвязаны. В *самосогласованных* моделях просчитываются все эти изменения, т. е. моделируется реальный процесс перехода к регулярным импульсам.

В отличие от такого подхода, в [1–4] для расчетов используется импульс тока $J(t)$, соответствующий уже установившемуся режиму регулярных импульсов, и с этим током проводятся итерации для определения предимпульсных значений входящих в расчет величин. Такие итерации не соответствуют никакому реальному процессу, поскольку начинаются с уже установившегося режима, в котором параметры задачи от импульса к импульсу уже не меняются. Такие итерации не обязаны приводить к правильным значениям предимпульсных параметров.

Серьезные отступления от самосогласованности модели связаны также с тем, что в [1–4] не проводится расчет температуры газа. Между тем хорошо известно, что расчет T_g необходим, т. к. от T_g существенно зависят условия работы ЛПМ.

Резюмируя изложенное выше, приходится констатировать, что метод моделирования лазера на парах меди,

применяемый в работах [1–4] и основанный на использовании импульса тока, измеренного в режиме регулярных импульсов, приводит к явно ошибочным значениям предимпульсной температуры электронов. В большинстве случаев она оказывается существенно ниже T_g и даже T_w . Учитывая, что релаксация плазмы в лазере на парах меди определяется трехчастичной рекомбинацией, резко зависящей от T_e , следует сделать вывод, что и расчет $n_e(0)$ ошибочен.

Поскольку работа лазера существенно зависит от предимпульсных параметров, то и другие результаты и выводы работ [1–4] должны содержать значительные ошибки. В частности не могут считаться обоснованными выводы о механизме влияния добавок водорода и о факторах, ограничивающих достижимую частоту повторения импульсов. Заметим, что выводы о механизме влияния добавок водорода, сделанные в [1, 2], отличаются от выводов, сделанных в работах других авторов, в том числе использовавших гораздо более обоснованные самосогласованные модели. В целом метод моделирования в [1–4] является явным шагом назад по сравнению с опубликованными ранее самосогласованными моделями [5, 6, 8–12].

1. Бойченко А.М., Евтушенко Г.С., Жданев О.В., Яковленко С.И. *Квантовая электроника*, **33** (12), 1047 (2003).
2. Boichenko A.M., Evtushenko G.S., Yakovlenko S.I., Zhdaneev O.V. *Laser Phys.*, **13** (10), 1231 (2003).
3. Бойченко А.М., Евтушенко Г.С., Жданев О.В., Яковленко С.И. *Оптика атмосферы и океана*, **16** (11), 1036 (2003).
4. Boichenko A.M., Evtushenko G.S., Yakovlenko S.I., Zhdaneev O.V. *Laser Phys.*, **14** (8), 1031 (2004).
5. Carman R.J., Mildren R.P., Withford M.J., Brown D.J.W., Piper J.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **36**, 438 (2000).
6. Cheng C., Sun W. *Optics Commun.*, **144**, 109 (1997).
7. Петраш Г.Г. *Препринт ФИАН № 4*, 3 (2005).
8. Carman R.J., Brown D.J.W., Piper J.A. *IEEE J. Quantum Electron.*, **30** (8), 1876 (1994).
9. Carman R.J., in *Pulsed Metal Vapour Lasers*. Ed by C.E.Little, N.V.Sabotinov (Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1996, p. 201).
10. Carman R.J. *J. Appl. Phys.*, **82** (1) 71 (1997).
11. Ivanov V.V., Klopovskii K.S., Mankelovich Yu.A., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4747**, 128 (2002).
12. Marshall G. D. *Kinetically Enhanced Copper Vapour Lasers*, PhD Thesis (Clarendon Laboratory, Oxford, 2002).
13. Hogan G.P. *A Study of the Kinetics of Copper Vapour Lasers*, PhD Thesis (University of Oxford, 1993).
14. Hogan G.P., Webb C.E. *Opt. Commun.*, **117**, 570 (1995).
15. Brown D.J.W., Withford M.J., Carman R.J., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **3889**, 261 (2000).